

【交通物流 / Transportation Logistics】

考虑旅客分类的高速铁路票价与票额综合优化

李鑫杰¹, 刘斌^{1,2}, 田志强^{1,2}, 马超凡¹

1) 兰州交通大学交通运输学院, 甘肃兰州 730070; 2) 兰州交通大学高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 甘肃兰州 730070

摘要: 高铁列车差异化定价是调节客流量, 优化运输资源供需匹配的有效手段, 能够提高列车上座率, 增加高速铁路客票收益. 针对高速铁路客票定价中存在的问题, 引入收益管理的思想, 分析不同经济水平旅客对票价的敏感度, 提出考虑旅客分类的票价和票额联合优化方法, 将旅行时间和票价作为衡量旅客出行费用的指标, 构建弹性需求函数描述客流量与票价之间的变化关系, 并通过logit模型测算各列车的客流分担率. 在此基础上, 以各起讫点(origin destination, OD)间不同列车的票额和票价为决策变量, 同时考虑列车票价上下限约束和列车能力约束等, 以高铁收益最大化为目标建立票价和票额联合优化模型, 设计模拟退火算法与杉数求解器COPT(cardinal optimizer)相结合的算法将模型分解为两阶段进行求解. 以京沪高铁列车为例对票价制定进行计算分析, 结果显示, 与现有的单一定价方案以及未考虑旅客类型的综合优化方案相比, 引入旅客类型的票价和票额联合优化方案的客票期望收益分别提高了5.03%和1.02%, 表明在票价票额联合优化的同时, 考虑旅客分类能有效提高高铁列车上座率与客票收益.

关键词: 交通运输规划与管理; 收益管理; 高速铁路; 票价; 票额; 联合优化; 杉数求解器COPT
中图分类号: U293.22; O221.2 文献标志码: A DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.01105

Comprehensive optimization of high-speed railway ticket pricing and quota considering passenger classification

LI Xinjie¹, LIU Bin^{1,2}, TIAN Zhiqiang^{1,2}, and MA Chaofan¹

1) School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China
2) Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: Differential pricing for high-speed railway (HSR) trains is an effective method for adjusting passenger flow and optimizing the supply-demand balance of transportation resources, which can improve the train occupancy and increase HSR ticket revenue. To address issues in HSR ticket pricing, we introduce the idea of revenue management, analyze the sensitivity of passengers from different economic levels to ticket prices, and then put forward a combined optimization method for ticket prices and quotas considering passenger classification, with travel time and ticket price as indicators to measure passenger travel costs, and an elastic demand function is constructed to

Received: 2024-04-26; **Accepted:** 2024-06-20; **Online (CNKI):** 2024-11-26

Foundation: National Natural Science Foundation of China (72161023, 71761023); Science and Technology Department Plan Project of Gansu Province (22JR5RA379, 22JR11RA159); Research Project of Higher Education Department of Gansu Province (2022QB-060); Open Subject Foundation of Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control (GYSHZ2302)

Corresponding author: Associate professor LIU Bin (liubin0909@mail.lzjtu.cn)

Citation: LI Xinjie, LIU Bin, TIAN Zhiqiang, et al. Comprehensive optimization of high-speed railway ticket pricing and quota considering passenger classification [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(1): 105-112. (in Chinese)



describe the changing relationship between passenger flow and ticket price. A logit model is then used to calculate the passenger flow sharing ratio for each train. Based on the model, the optimization model of ticket price and quota is developed, with the ticket price and quota of different trains between origin destination (OD) pairs as decision variables while considering constraints such as the upper and lower limit limits of train price and train capacity. To solve the model, an algorithm combining simulated annealing algorithm and cardinal optimizer (COPT) solver is designed to decompose the model into two stages. A case study on the Beijing-Shanghai high-speed railway train is conducted to analyze the fare formulation. The results show that compared with the existing single pricing scheme and the comprehensive optimization scheme without considering the passenger type, the expected revenue from passenger tickets of the comprehensive optimization scheme with passenger classification increases by 5.03% and 1.02%, respectively. This indicates that considering passenger classification while jointly optimizing the ticket prices and quotas can effectively improve the occupancy rate and ticket revenue of high-speed railway.

Key words: transportation planning and management; revenue management; high-speed railway; ticket price; ticket amount; joint optimization; cardinal optimizer (COPT) solver

截至 2023 年底, 中国高速铁路营业里程已达 4.5 万 km. 高铁长期采用固定票价, 从 2010 年起逐步改革, 如 2016 年, 国家发展和改革委员会出台《关于改革完善高铁动车组旅客票价政策的通知》^[1], 放开了铁路部门对票价的制定权. 但目前定价方式尚未能充分考虑市场需求和铁路企业收益, 导致运力浪费, 难以实现收益最大化. 因此, 制定合理的定价机制, 建立灵活的票额分配体系, 已成为高速铁路未来发展中的重要问题.

高铁定价问题早已得到了国内外学者的广泛关注, 现有研究大多侧重单一的票价或票额, 而联合优化研究相对较少. YAO 等^[2]对市场份额与票价关系进行理论分析, 建立基于陈述偏好 (stated preference, SP) 数据的嵌套结构分解选择模型, 制定武广高铁定价策略; ZHENG 等^[3]基于分段定价策略, 建立票价优化模型, 探讨最优多级票价的性质; YIN 等^[4]建立以列车收入最大化为目标的模型, 研究考虑预售期旅客动态需求特征的高铁客票定价与票额分配联合优化问题; KIM 等^[5]构建基于重力模型的直接需求估计模型, 分析铁路票价和旅行时间的决定因素及其影响; ARMSTRONG 等^[6]回顾了旅客运输收益管理的相关方法, 并指出未来旅客运输应致力于选择模型与定价和分配方案的研究; 宋文波等^[7]在单列车情况下, 以客票收益最大化为目标, 构建不确定需求下的票额票价联合优化模型, 并运用稳健优化的方法进行求解; 秦进等^[8]提出优化票价与票额的创新模型, 考虑受价格影响的弹性客流, 发现联合优化模型能产生更大收益.

在分析旅客行为方面, 多数研究采用弹性客流描述旅客需求变化, 较少讨论不同类型旅客的差

异. 李雪梅等^[9]考虑旅客差异以及竞争因素, 使用 Epsilon 约束法构建了双层模型; 李文君等^[10]运用需求弹性理论, 对收入、速度及票价等因素进行弹性分析, 并对高铁运营管理提出建议; 杨宇航等^[11]根据旅客的时间价值制定定价策略, 并分析旅客对票价的敏感程度; 胡心磊等^[12-13]通过聚类方法和特征分析对列车进行分类, 构建了客票分类定价与票额分配的联合优化模型.

现有研究多侧重于单一类型旅客, 或将票额分配与客票定价分开研究. 然而不同旅客的偏好和需求各异, 高铁服务水平和票价对其出行选择的影响也存在差异. 因此, 在高铁定价问题中引入旅客分类能更加真实地反映客流变化. 同时, 高铁票价制定与票额分配密切相关, 在票价制定同时联合优化票额分配, 不仅能提升客票收益, 还能改善供需匹配. 本研究根据历史数据对旅客进行分类, 将高速铁路客票销售利润最大作为模型优化目标, 引入多种类型的旅客, 建立票价和票额综合优化模型.

1 问题描述

旅客列车的票价和票额对运能供给和旅客需求至关重要. 票价基于供需关系调整, 来平衡运力供给和需求; 票额分配则根据预测或实际客流需求来制定. 根据不同时间段、不同起讫点 (origin destination, OD) 的需求, 合理分配票额, 以满足旅客需求. 因此, 票额分配与客票定价相互联系、相互影响.

实际中不同旅客对票价和旅行时间的偏好各异, 在高铁定价问题中引入旅客类别能更真实反映

客流变化, 采用需求弹性系数可以合理描述这些差别, 从而衡量不同类型乘客对票价的敏感程度.

本研究问题可描述为: 将某条高铁线路作为研究对象, 在明确旅客需求弹性特征以及出行费用对旅客出行需求影响规律的基础上, 以最大化高速铁路运营单位票价收益为目标, 同时考虑列车能力和票价上下限约束, 寻求每个 OD 对应的最优票价及相应的票额分配策略. 问题的基本假设为: ① 由于一等座及商务座旅客较少, 因此, 仅考虑二等座; ② 不考虑售票过程中的退票和改签情况; ③ 所有 OD 间同类型旅客具有相同的价格弹性.

2 票价与票额综合优化模型建立

2.1 参数与变量定义

考虑到不同类型旅客对票价的敏感程度不同, 将高速铁路乘客划分为 K 类, 不同类型旅客的客流量随客票价格改变而变化. 模型参数及变量设置如表 1.

2.2 模型构建

现有政策规定高速铁路票价上限由发改委和铁路部门联合决定, 实际执行票价是该票价上限的折扣价, 执行票价 p_{rs}^h 在一定范围内浮动, 即

$$p_{rs}^h \in \left(\underline{p}_{rs}^h, \bar{p}_{rs}^h \right) \quad (1)$$

第 k 类旅客选择 (r, s) 间列车 h 的广义出行费用 $c_{rs}^h(k)$ 包括旅客的出行时间费用和高铁票价, 即

$$c_{rs}^h(k) = t_{rs}^h v_k + p_{rs}^h \quad (2)$$

对于第 k 类旅客, 服务 (r, s) 所有列车的旅客平均出行时间价值 \bar{v}_{rs}^k 和平均票价 \bar{p}_{rs} 为

$$\bar{v}_{rs}^k = \frac{\sum_{h \in H_{rs}} e_{rs}^h(k) t_{rs}^h v_k}{\sum_{h \in H_{rs}} e_{rs}^h(h)} \quad (3)$$

$$\bar{p}_{rs} = \frac{\sum_{h \in H_{rs}} e_{rs}^h(k) p_{rs}^h}{\sum_{h \in H_{rs}} e_{rs}^h(k)} \quad (4)$$

其中, 预计售票量 $e_{rs}^h(k)$ 是根据历史售票数据得到的合理值.

对于第 k 类旅客, 服务 (r, s) 所有列车的平均出行费用 \bar{c}_{rs}^k 为

$$\bar{c}_{rs}^k = \bar{v}_{rs}^k + \bar{p}_{rs} \quad (5)$$

在旅客运输市场中, 不同类型的旅客对价格的敏感度各不相同, 当运输产品的价格发生变动时,

表 1 参数与变量设置

Table 1 Parameter and variable settings

| 类型 | 符号 | 含义 |
|----|------------------------|---|
| 集合 | H | 列车集合, (r, s) 内车次 $h \in H$ |
| | L | 高速铁路线路上停靠的车站数 |
| | W | OD 对集合, OD 对 $(r, s) \in W$ |
| 参数 | η_k | 第 k 类旅客的需求弹性系数, 反映旅客需求对票价变化的敏感性 |
| | t_{rs}^h | 列车 h 在 (r, s) 的旅行时间 |
| | p_{rs}^{0h} | (r, s) 间列车 h 的现行票价 |
| | v_k | 第 k 类旅客的时间价值系数 |
| | $e_{rs}^h(k)$ | (r, s) 间乘坐列车 h 的第 k 类旅客的预计售票量 |
| | a_k | 第 k 类旅客在所有类型旅客中的数量占比 |
| | \bar{p}_{rs}^h | 列车 h 在 (r, s) 的票价上限 |
| | \underline{p}_{rs}^h | 列车 h 在 (r, s) 的票价下限 |
| | u_{rs}^h | 0-1 变量, 列车 h 是否能在 (r, s) 提供运输服务, 若能则为 1, 不能则为 0 |
| | C_h | 列车 h 的定员 |
| 变量 | K | 旅客种类 |
| | $c_{rs}^h(k)$ | 第 k 类旅客在 (r, s) 乘坐列车 h 的广义费用函数 |
| | R_{rs}^h | 列车 h 在 (r, s) 的期望收益 |
| | $D_{rs}^h(p_{rs}, k)$ | 列车 h 在 (r, s) 的第 k 类旅客弹性客流 |
| 决策 | $A_{rs}^h(k)$ | (r, s) 间列车 h 对于第 k 类旅客的客流分担率 |
| | b_{rs}^h | 列车 h 在 (r, s) 的票额 |
| 变量 | p_{rs}^h | 列车 h 在 (r, s) 间票价 |

不同类型客流的需求也会随之变化. 因此, 对于在 (r, s) 间的第 k 类旅客, 定义其弹性需求为

$$D_{rs}^k(\bar{c}_{rs}) = a_k D_{rs}^{0k} \exp \left[-\eta_k \left(\frac{\bar{c}_{rs}^k}{\bar{c}_{rs}^{0k}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

其中, $\bar{c}_{rs}^{0k} = \bar{v}_{rs}^k + p_{rs}^0$, \bar{c}_{rs}^{0k} 为费用 \bar{c}_{rs}^k 的 1 个合理取值; $a_k D_{rs}^{0k}$ 是费用 \bar{c}_{rs}^{0k} 所对应的客流需求.

使用 logit 模型对客流进行分配, 计算出列车 h 在 (r, s) 间对第 k 类旅客的客流分担比例为

$$A(h, c_{rs}, k) = \frac{\exp[-\theta c_{rs}^h(k)]}{\sum_{j \in H_{rs}} \exp[-\theta c_{rs}^j(k)]} \quad (7)$$

其中, θ 为换算系数. 因此, 可推导出第 k 类旅客在 (r, s) 间对列车 h 的弹性需求为

$$D_{rs}^h(p_{rs}^h, k) = D_{rs}^h(\bar{c}_{rs})A(h, c_{rs}, k) = \\ a_k D_{rs}^0 \exp \left[-\eta_k \left(\frac{\bar{c}_{rs}^k}{\bar{c}_{rs}^0} - 1 \right) \right] A(h, c_{rs}, k) \quad (8)$$

客票的实际销售额直接受其所在 OD 间的需求量影响, 对于列车 h , 在 (r, s) 的票额决策变量为 b_{rs}^h , 票价决策变量为 p_{rs}^h , 该 OD 的实际客票销售量由需求量 $D_{rs}^h(p_{rs}^h, k)$ 决定. 当 $b_{rs}^h < \sum_k D_{rs}^h(p_{rs}^h, k)$ 时, 旅客在该 OD 对列车 h 的需求超出分配的票额, 超出部分的旅客不考虑其 2 次选择, 而将其视为新的旅客, 作为其他列车的客流出现; 当 $b_{rs}^h \geq \sum_k D_{rs}^h(p_{rs}^h, k)$ 时, 该 OD 间旅客的需求不超过分配的票额, 所有旅客的购票需求全部被接受. 列车 h 在 (r, s) 的售票量为

$$S_{rs}^h = \min \left\{ b_{rs}^h, \sum_{k=1}^K D_{rs}^h(p_{rs}^h, k) \right\}, (r, s) \in W, h \in H \quad (9)$$

列车 h 在 (r, s) 的客票期望收益为

$$R_{rs}^h = p_{rs}^h S_{rs}^h = \\ p_{rs}^h \min \left\{ b_{rs}^h, \sum_{k=1}^K D_{rs}^h(p_{rs}^h, k) \right\}, (r, s) \in W, h \in H \quad (10)$$

综上, 构建需求不确定下的高铁客票定价与票额分配联合优化模型为

$$\max \sum_{(r,s) \in W} \sum_{h \in H} p_{rs}^h \min \left\{ b_{rs}^h, \sum_{k=1}^K D_{rs}^h(p_{rs}^h, k) \right\} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{r=1}^l \sum_{l+1}^L u_{rs}^h b_{rs}^h \leq C_h \quad (12)$$

$$h \in H, 1 \leq l \leq L-1, l \in \mathbf{N} \quad (13)$$

$$p_{rs}^h \leq \bar{p}_{rs}^h, h \in H, r < s \quad (14)$$

$$b_{rs}^h \in \mathbf{N} \quad (15)$$

$$(\mu_{rs}^h - 1)b_{rs}^h = 0 \quad (16)$$

其中, 式(11)为目标函数, 模型目标是使客票收益最大化; 式(12)和(13)是列车能力约束, 使包含相同区段的列车 OD 所分配的票额总数不超过该列车的最大能力; 式(14)为票价的上下界约束; 式(15)表示票额需是 1 个非负整数; 式(16)是对列车 h 在 (r, s) 是否能够提供运输服务进行判断, 其中, $u_{rs}^h \in \{0, 1\}$, 若列车 h 在 (r, s) 提供运输服务, 则 $u_{rs}^h = 1$, 否则 $u_{rs}^h = 0$; 当 $u_{rs}^h = 1$ 时, $\mu_{rs}^h - 1 = 0$, 则 $b_{rs}^h \geq 0$; 当 $u_{rs}^h = 0$ 时, $\mu_{rs}^h - 1 = -1$, 则 b_{rs}^h 必为 0.

列车在 (r, s) 的票额分配量取决于该 OD 的需求量, (r, s) 分配的票额数量一定小于或等于该 OD 的需求量, 故为简化模型, 降低求解复杂度, 假设各车次和各 OD 的弹性需求为确定性需求, 将原模型

改写为混合整数非线性规划模型, 即

$$\max \sum_{(r,s) \in W} \sum_{h \in H} p_{rs}^h b_{rs}^h \quad (17)$$

$$\text{s. t. } \sum_{r < s} b_{rs}^h \leq D_{rs}^h(p_{rs}^h, k), h \in H \quad (18)$$

模型其余内容同式(13)—(16).

3 求解算法

本研究的高速铁路票价与票额联合优化问题涉及多变量决策、旅客分类需求差异以及动态需求特性, 采用两阶段求解策略来分解并处理这一复杂问题. 其中, 第 1 阶段为基于模拟退火(simulated annealing, SA)算法的票价方案寻优; 第 2 阶段采用杉数求解器 COPT(cardinal optimizer)对票额分配方案进行求解.

3.1 基于 SA 算法的列车票价寻优

SA 算法在 1 个初始解的基础上进行迭代优化, 列车 h 在 (r, s) 的票价上下限已知, 因此, 随机生成各 OD 间每列车的初始票价集合 $P = [p_{12}^1, p_{12}^2, \dots, p_{rs}^h]$.

根据式(6)可得到弹性客流, 将弹性客流值和票价带入到改写后的模型中, 得到只有 1 个决策变量的模型, 再使用 COPT 对模型进行求解. 求解可得初始票价集合下的最大客票收益, 在票价约束内进行扰动寻找新的票价集合, 并带入模型求解, 将解得的结果与上一个结果相比较, 选择收益相对高的票价集合.

3.2 基于 COPT 的票额分配方案求解

不考虑超出列车票额那部分旅客的二次选择, 在算法中也不直接计算超出部分客流转移到其他车次的数量, 而是通过弹性需求函数计算旅客对各 OD 各列车的需求. 故在根据 SA 算法得到票价方案集合后, 带入式(8)得到弹性客流, 将票价和弹性客流代入改写后的模型中, 得到只有票额这一决策变量的模型. 这样就能将原本复杂的混合整数非线性模型简化为更易处理的混合整数线性模型. 最后使用 COPT 求解器求解, 得到此票价方案下使客票收益最大化的票额分配方案.

3.3 算法步骤

① 基于线路的历史售票数据, 分析得到各 OD 客流量及停站方案, 给定各 OD 的初始票额. ② 初始化, 设初始温度为 T_0 、降温速率为 α 、终止温度为 T_f 及同温度下最大迭代次数为 N , 令当前温度

$T = T_0$, 当前迭代次数 $n = 1$. ③ 生成初始票价集合 P , 将票价集合带入改写后模型, 使用 COPT 求解器计算出相应的最大客票收益和对应的票额分配方案. 记当前的全局最优解为 $P^* = P$. ④ 邻域解构造, 根据初始解 P 生成邻域解 P' . ⑤ 根据新解得出新的客票收益, 若 $R(P') \geq R(P^*)$, 则令 $P^* = P = P'$, 转至⑦; 否则转至⑥. ⑥ 在 Metropolis 准则检验中, 记 $\Delta R = R(P') - R(P)$, 引入参数 $P(A) = \exp(-\Delta R/T)$ 表示接受较差解的概率. 令 $\gamma \in U(0, 1)$, 若 $\gamma < P(A)$, 则接受较差解, 令 $P = P'$; 若 $\gamma \geq P(A)$, 不会将该较差解作为当前解. ⑦ $n = n + 1$, 若 $n \geq N$, 转至⑧, 否则返回④. ⑧ $T' = T\alpha$, 令 $T = T'$, 若 $T \leq T_r$, 计算结束, 输出结果 P^* ; 若 $T > T_r$, $n = 1$, 返回④.

4 算例分析

京沪高铁是中国高速铁路网中最繁忙的线路之一, 是高速铁路系统的典型代表. 本研究选取京沪高铁作为研究对象, 运用所提出的模型进行计算, 并对客票定价和票额分配联合优化模型参数进行灵敏度分析.

选取北京南—上海虹桥方向的 G7、G3、G21 及 G11 共 4 趟列车, 该线路有 7 个区段、8 个停靠站共计 28 个 OD. 客流量和初始票价参考历史销售数据, 各车次停站方案如图 1.

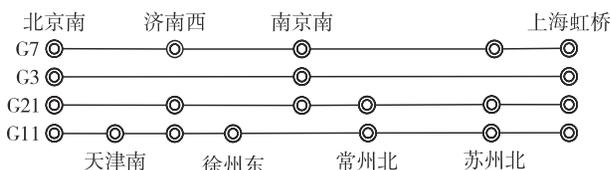


图 1 列车停站方案

Fig. 1 Train stopping scheme.

G7、G3、G21 及 G11 的列车定员分别为 1 285、1 285、1 193 及 1 283 人. 将现行票价作为基准票价, 根据 2017 年 4 月东南沿海高铁允许票价最高上浮 20% 的规定, 本研究选取基准票价的 120% 作为最高票价, 最低票价参考铁路运输企业需要向运输部报备的最低权限, 设定为基准票价的 60%.

根据文献[11]和[14]中对旅客收入水平以及价格和时间敏感度的调查统计数据, 将旅客分为经济型、中间型和商务型 3 类, 其时间价值系数分别为 9、32 和 58 元/h. 其他参数取值为^[15]: $\theta = 0.012$ 、

$\eta_1 = 0.8$ 、 $\eta_2 = 1$ 、 $\eta_3 = 1.4$ 、 $\alpha = 0.99$ 、 $T_0 = 1 000$ 、 $T_r = 0$ 及 $N = 1 000$. 商务型旅客为进行出差或商务活动对出行时间要求较高的旅客.

通过 Python 编程完成计算, 得出客票最大收益为 3 371 763 元, 较原票价下对应的收益 3 210 379 元增长了 5.03%. 优化后各 OD 间每列车的票价如表 2. 表 3 为各列车所分配的票额. 将未优化的票价作为初始方案, 不划分旅客类型的方案作为方案 I, 将旅客划分为两类的方案作为方案 II, 本研究方案作为方案 III, 进行收益比较, 结果如表 4.

票价调整会影响不同 OD 间的客流, 如表 2 和

表 2 列车在各 OD 的票价
Table 2 Train fares in all ODs

| OD | 优化票价/元 | | | | 原 OD 票价/元 |
|----------|--------|-----|-----|-----|-----------|
| | G7 | G3 | G21 | G11 | |
| 北京南—天津南 | | | | 40 | 67 |
| 北京南—济南西 | 223 | | 268 | 249 | 223 |
| 北京南—徐州东 | | | | 293 | 370 |
| 北京南—南京南 | 461 | 454 | 453 | | 533 |
| 北京南—常州北 | | | 531 | 431 | 590 |
| 北京南—苏州北 | 380 | | | 603 | 627 |
| 北京南—上海虹桥 | 699 | 694 | 703 | 695 | 662 |
| 天津南—济南西 | | | | 150 | 156 |
| 天津南—徐州东 | | | | 354 | 310 |
| 天津南—常州北 | | | | 499 | 563 |
| 天津南—苏州北 | | | | 603 | 573 |
| 天津南—上海虹桥 | | | | 645 | 609 |
| 济南西—徐州东 | | | | 116 | 157 |
| 济南西—南京南 | 378 | | 219 | | 333 |
| 济南西—常州北 | | | 238 | 449 | 397 |
| 济南西—苏州北 | 506 | | | 377 | 439 |
| 济南西—上海虹桥 | 331 | | 573 | 371 | 479 |
| 徐州东—常州北 | | | | 212 | 254 |
| 徐州东—苏州北 | | | | 261 | 297 |
| 徐州东—上海虹桥 | | | | 260 | 337 |
| 南京南—常州北 | | | 45 | | 72 |
| 南京南—苏州北 | 142 | | | | 118 |
| 南京南—上海虹桥 | 119 | 150 | 145 | | 162 |
| 常州北—苏州北 | | | | 30 | 46 |
| 常州北—上海虹桥 | | | 85 | 73 | 91 |

注: 空白部分表示无此 OD.

表3 各OD内列车分配的票额

Table 3 Ticket allocation for trains within each ODs

| OD | G7 | G3 | G21 | G11 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 北京南—天津南 | | | | 129 |
| 北京南—济南西 | 28 | | 16 | 20 |
| 北京南—徐州东 | | | 0 | 33 |
| 北京南—南京南 | 38 | 44 | 43 | |
| 北京南—常州北 | | | 6 | 17 |
| 北京南—苏州北 | 23 | | | 14 |
| 北京南—上海虹桥 | 1 101 | 1 238 | 1 045 | 1 070 |
| 天津南—济南西 | | | | 46 |
| 天津南—徐州东 | | | | 10 |
| 天津南—常州北 | | | | 13 |
| 天津南—苏州北 | | | | 18 |
| 天津南—上海虹桥 | | | | 33 |
| 济南西—徐州东 | | | | 32 |
| 济南西—南京南 | 9 | | 57 | |
| 济南西—常州北 | | | 13 | 1 |
| 济南西—苏州北 | 3 | | | 17 |
| 济南西—上海虹桥 | 41 | | 2 | 25 |
| 徐州东—常州北 | | | | 14 |
| 徐州东—苏州北 | | | | 28 |
| 徐州东—上海虹桥 | | | | 18 |
| 南京南—常州北 | | | 13 | |
| 南京南—苏州北 | 15 | | | |
| 南京南—上海虹桥 | 62 | 44 | 46 | |
| 常州北—苏州北 | | | | 16 |
| 常州北—上海虹桥 | | | 14 | 16 |

注：空白部分表示无此OD.

表4 不同方案下的客票收益

Table 4 Ticket revenue under different schemes

| 方案 | 客票收益/元 | 与初始方案相比的收益增幅/% |
|-----|-----------|----------------|
| 初始 | 3 210 379 | 0 |
| I | 3 339 162 | 4.01 |
| II | 3 357 448 | 4.58 |
| III | 3 371 763 | 5.03 |

表3, 在需求较多的OD提高票价上座率变化较小, 在需求较少的OD降低票价吸引更多旅客以提高上座率, 以实现高速铁路运营企业利润最大化. 由表3可见, 在客流量变化不大的情况下, 客票收益发生显著增长, 表明客票销售的收益并非单纯由数量决定, 将客票销售给愿意支付更高价格的旅客能够

带来更大经济回报.

由表4可见, 方案I相较于初始票价方案客票收益提升了4.01%; 对旅客进行分类后, 优化得到的收益相较于初始方案得到进一步提升; 在对旅客分类的情况进行更加细致的讨论后发现, 方案III相对于初始方案收益提升了5.03%, 与方案II相比收益又得到提升. 这表明将旅客进行细分后, 票价和票额联合优化能够获得更大收益.

为进一步分析影响客票收益的因素, 设置不同的票价上限进行优化, 结果如图2. 可见, 分别采用现行票价的100%~160%作为优化时的票价上限, 在上限从100%上升到120%过程中, 客票收益呈现出上升趋势, 超过120%后出现上下波动, 且在该过程中客票收益始终大于原票价对应收益.

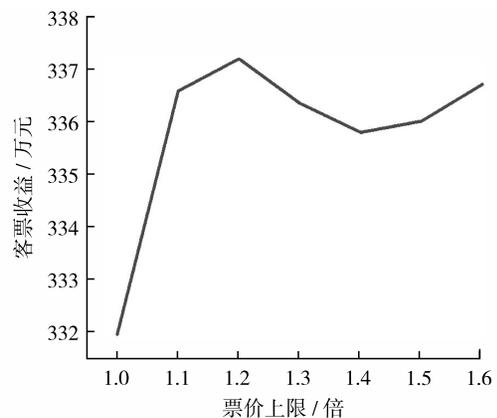


图2 票价上限对客票收益的影响

Fig. 2 The impact of ticket price caps on ticket revenue.

当票价上限设定为现行票价水平时, 客票收益增加主要源于通过票价折扣吸引的额外旅客. 当票价上限高于现行票价时, 除了上述收益外, 还有因票价上涨获得的收益, 主要来自同列车上商务型旅客愿意多支付的金额高于因票价上涨而损失的乘客带来的收益. 对于某些较为热门的OD和车次, 旅客需求量较大, 列车能力不能满足所有需求. 此时若上调票价, 仍能保持较高的上座率, 且客票收益也得到提升.

图3为不同参数对客票收益的影响, 可以体现参数的灵敏度变化. 由图3(a)可见, 通过对商务型旅客的需求弹性系数进行灵敏度分析, 发现随着该参数上升, 客票收益呈缓慢下降趋势, 且过程中存在波动. 这是因为在整体出行旅客中经济型旅客占据较大比例, 商务型旅客相对较少, 且存在票价涨幅限制, 因此, 商务型旅客需求弹性系数的变动对客票收益的影响相对有限.

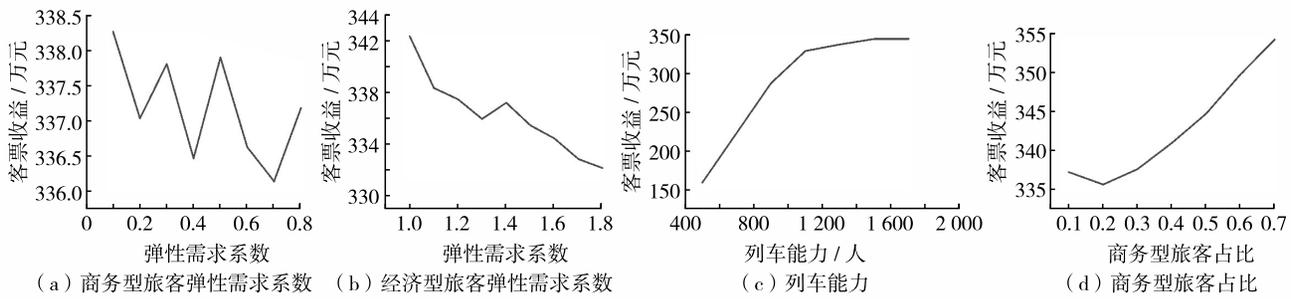


图3 不同参数对客票收益的影响

Fig. 3 The effect of (a) elastic demand coefficients of business passengers and (b) economy passengers, (c) train capacity, and (d) proportion of business travelers on ticket revenue.

图3(b)则展示了经济型旅客需求弹性系数的灵敏度分析,随着该系数的上升,客票收益呈明显下降趋势.这主要是因为经济型旅客在旅客总量中占比较大,其对票价的敏感度较高.在运力受限的情况下,票价下降所引发的额外需求并不能得到充分满足,同时较高的价格敏感度也限制了铁路部门通过票价上涨获取额外收益的能力.图3(c)是随着列车能力提升,客票收益的变化情况.

表5为商务型旅客占比对旅客需求的影响.由图3(d)和表5可见,商务旅客占比增加时,客票收益上升但总客流量下降.这是因为商务旅客对票价不敏感,票价上涨带来的额外收益超过了需求减少的损失.综上分析可见,优化后该线路上限制客票收益的主要因素是列车能力.

表5 商务型旅客占比对旅客需求的影响

Table 5 The impact of the proportion of business travelers on passenger demand

| 商务型旅客占比 | 列车需求/人 | | | |
|---------|--------|-------|-------|-------|
| | G7 | G3 | G21 | G11 |
| 0.2 | 1 365 | 1 333 | 1 253 | 1 563 |
| 0.3 | 1 367 | 1 331 | 1 286 | 1 541 |
| 0.4 | 1 267 | 1 166 | 1 301 | 1 364 |
| 0.5 | 1 183 | 1 281 | 1 119 | 1 358 |
| 0.6 | 1 209 | 1 259 | 1 194 | 1 260 |
| 0.7 | 1 190 | 1 297 | 1 212 | 1 303 |

结 语

本研究提出根据旅客分类进行高铁票价和票额联合优化的策略.根据历史数据确定旅客分类,构建旅客弹性需求函数,采用logit模型确定旅客分担

率,构建联合优化模型,并基于其特性设计结合启发式算法和COPT算法的两阶段求解策略.以京沪高铁作为案例,验证了模型和算法的有效性.研究结果可为高铁运营部门制定更为合理的票价和票额机制提供有益参考.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72161023,71761023); 甘肃省科技厅计划资助项目(22JR5RA379,22JR11RA159); 甘肃省教育厅高等学校科研基金资助项目(2022QB-060); 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室开放课题资助项目(GYYSHZ2302)

作者简介: 李鑫杰(11220019@stu.lzjtu.edu.cn), 兰州交通大学硕士研究生. 研究方向: 高铁收益管理.

引 文: 李鑫杰, 刘斌, 田志强, 等. 考虑旅客分类的高速铁路票价与票额综合优化[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(1): 105-112.

参考文献 / References:

[1] 中国政府网. 高铁动车票价企业自主定[EB/OL]. (2016-02-22) [2024-02-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-02/22/content_5044771.htm. Chinese Government Website. High speed rail and bullet train ticket prices are independently determined by enterprises [EB/OL]. (2016-02-22) [2024-02-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-02/22/content_5044771.htm. (in Chinese)

[2] YAO Enjian, YANG Qirong, ZHANG Yongsheng, et al. A study on high-speed rail pricing strategy in the context of modes competition [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2013, 2013(1): 715256.

[3] ZHENG Jinzi, LIU Jun, CLARKE D B. Ticket fare optimization for China's high-speed railway based on passenger choice behavior [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2017, 2017(1): 6237642.

[4] YIN Xiaofeng, LIU Di, RONG Wenyu, et al. Joint optimization of ticket pricing and allocation on high-speed railway based on dynamic passenger demand during pre-

- sale period: a case study of Beijing-Shanghai HSR [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 10026.
- [5] KIM W, KIM J W, LEE B, et al. A model of the elasticity of railway fare and travel time of general trains [J]. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2017, 12: 299-308.
- [6] ARMSTRONG A, MEISSNER J. Railway revenue management: overview and models [EB/OL]. (2010-07-26) [2024-02-20]. <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/49017/1/Document.pdf>.
- [7] 宋文波, 赵鹏, 李博. 高速铁路单列车动态定价与票额分配综合优化研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(7): 10-16.
SONG Wenbo, ZHAO Peng, LI Bo. Research on comprehensive optimization of dynamic pricing and seat allocation for high-speed single train [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(7): 10-16. (in Chinese)
- [8] 秦进, 郝丽娜, 毛成辉, 等. 基于收益管理的高速铁路票价与坐席分配联合优化[J]. *铁道学报*, 2020, 42(12): 10-17.
QIN Jin, HAO Lina, MAO Chenghui, et al. Joint optimization method of high-speed rail ticket price and seat allocation based on revenue management [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(12): 10-17. (in Chinese)
- [9] 李雪梅, 曹慧卓. 基于Epsilon约束法的高速铁路客票多目标定价研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(1): 6-11, 26.
LI Xuemei, CAO Huizhuo. Multi-objective pricing of high-speed railway passenger tickets based on epsilon-constraint method [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(1): 6-11, 26. (in Chinese)
- [10] 李文君, 符卓. 高速铁路客运需求弹性分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(11): 2115-2124.
LI Wenjun, FU Zhuo. Elasticity analysis for high-speed railway passenger transport demand [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(11): 2115-2124. (in Chinese)
- [11] 杨宇航, 张琦. 京沪高速铁路票价调整与优化策略研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(10): 2043-2049.
YANG Yuhang, ZHANG Qi. Research on ticket price adjustment and optimization strategy of the Beijing-Shanghai high speed railway [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2043-2049. (in Chinese)
- [12] 胡心磊, 史峰, 秦进. 面向票价票额综合优化的高速铁路客票分类定价策略[J]. *铁道学报*, 2022, 44(7): 1-10.
HU Xinlei, SHI Feng, QIN Jin. Pricing strategy by category for joint optimization of pricing and seat allocation problem in high-speed rail networks [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(7): 1-10. (in Chinese)
- [13] 周文梁, 蔡炜, 刘晓航, 等. 高铁列车差异化票价与票额协同优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(4): 869-876.
ZHOU Wenliang, CAI Wei, LIU Xiaohang, et al. Optimization of differentiated fare and ticket amount for high-speed train [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(4): 869-876. (in Chinese)
- [14] 徐彦. 基于收益管理的高铁动态定价方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(2): 319-325.
XU Yan. Dynamic pricing method for high-speed railway based on revenue management [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(2): 319-325. (in Chinese)
- [15] 秦进, 黎熙琼, 杨康, 等. 基于前景理论的高铁差异化定价优化方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(7): 1820-1829.
QIN Jin, LI Xiqiong, YANG Kang, et al. Differential pricing of high-speed railway passenger ticket based on prospect theory [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(7): 1820-1829. (in Chinese)

【中文责编：方圆；英文责编：淡紫】